

The Development of Real Time Automatic Patient Position Correction System during the Radiation Therapy Based on CCD: A Feasibility Study

Dongho Shin*, Kwangzoo Chung[†], Meyoung Kim*, Jaeman Son^{*†}, Myonggeun Yoon[†],
Young Kyung Lim*, Se Byeong Lee*

*Proton Therapy Center, National Cancer Center, Goyang, [†]Department of Radiation Oncology,
Samsung Medical Center, [‡]Department of Bio-convergence Engineering,
Korea University College of Health Science, Seoul, Korea

Upon radiation treatment, it is the important factor to monitor the patient's motion during radiation irradiated, since it can determine whether the treatment is successful. Thus, we have developed the system in which the patient's motion is monitored in real time and moving treatment position can be automatically corrected during radiation irradiation. We have developed the patient's position monitoring system in which the patient's position is three dimensionally identified by using two CCD cameras which are orthogonal located around the isocenter. This system uses the image pattern matching technique using a normalized cross-correlation method. We have developed the system in which trigger signal for beam on and off is generated by quantitatively analyzing the changes in a treatment position through delivery of the images taken from CCD cameras to the computer and the motor of moving couch can be controlled. This system was able to automatically correct a patient's position with the resolution of 0.5 mm or less.

Key Words: 3D moving couch, Position correction, Patient positioning, Gating

서 론

방사선치료 시 정확한 치료를 위해 최근 방사선치료기기에 다양한 형태의 영상 유도장치가 설치되어 환자의 종양의 위치를 확인 하고 있다.¹⁾ 환자의 움직임이나 호흡에 의해 움직이는 종양을 치료하기 위해서 몇 가지의 방법으로 이를 해결 하였다. 기존의 일반적인 방사선치료의 경우 환자의 치료 위치설정의 오차나 호흡에 의한 움직임을 고려하여 큰 치료면의 여백을 부여하는 방식이다.²⁾ 또 호흡에 의한 종양의 움직임은 호흡연동장치(respiration gating system)를 이용하여 환자체표에 부착된 표적체의 움직임을 추적하여 종양의 움직임을 추적하거나 저에너지 진단용 X선 영상을 이용하여 종양의 위치를 추적하여 호흡연동장치³⁾

또는 종양 추적장치(tracking system)와 병행 사용하여 치료빔을 조절하는 방법도 있다.^{4,5)} 이들 방법은 효과 적으로 종양을 추적하여 방사선치료의 성적을 높였다. 그러나 위에서 언급한 기술들은 환자의 호흡에 의한 종양의 움직임에 대한 추적하거나 종양의 위치를 일정 시간 추적하여 예견하는 방식으로 환자의 호흡에 의한 종양의 움직임을 주로 추적하고 있다.

최근 방사선치료기의 성능과 치료방법의 발달로 치료의 성적은 날로 높아지고 있다 그러나 이에 따라 방사선의 조사시간 또한 함께 증가하고 있어 환자들이 치료테이블에 누워있는 치료시간 또한 증가하고 있다.

특히 세기변조방사선치료와 같은 경우 일반 3차원 입체조형 방사선치료에 비해 많은 빔 조사시간이 소요된다. 또 양성자치료의 경우 일반적인 산란방식(scattering mode)⁶⁾의 빔 전달에 비해 고른 주사빔 방식(uniform mode)⁷⁾ 또는 실빔주사방식(pencil beam scanning mode)⁸⁾에서 더 많은 방사선 조사시간이 소요되어 환자의 치료시간이 증가하고 있다.

또한 대부분의 3차원 입체조형방사선치료의 경우 치료

본 연구는 2013년도 국립암센터 기관고유(1110600)연구과제의 지원을 받아 수행되었음.

이 논문은 2013년 8월 26일 접수하여 2013년 9월 6일 채택되었음.

책임저자 : 신동호, (440-769) 경기도 고양시 일산동구 일산로 323

국립암센터 양성자치료센터

Tel: 031)920-1727, Fax: 031)920-0149

E-mail: dongho@ncc.re.kr

전 환자의 위치를 확인 하고 치료 빔이 조사되는 동안 환자의 움직임을 전하결합 소자 카메라(CCD camera)를 통해 촬영된 TV화면을 통해 정성적으로 치료조정실의 근무자의 판단에 의해 확인 되고 있다. 따라서 치료중 환자의 움직임으로 인한 잘못된 방사선 조사에 대한 대비책이나 해결책이 충분하지 않은 상태이다.

따라서 본 연구는 X영상을 이용한 방사선 치료 중 실시간 종양의 위치를 추적하고 이를 통해 변화된 치료위치를 보정 및 추적할 수 있는 시스템을 개발을 위한 개념 및 기술을 확보하기 위한 기초실험이다. 본 연구에서는 방사선 치료 시 치료 전 환자의 위치를 확인 한 후 방사선이 조사되는 동안 환자의 움직임을 전하결합소자 카메라를 이용하여 실시간으로 추적하고 인위적 또는 무의식적인 움직임에 의한 위치변화를 정량적으로 분석한다. 분석된 위치변화의 크기에 따라 자동으로 방사선의 켜고 끄를 조절하는 연동장치와 환자의 움직인 치료위치를 자동으로 이동시켜 정확

한 치료위치로 보내어 위치를 보정해주는 환자 움직임 치료테이블 시스템을 개발 하여 오랜 시간 방사선 치료 시 환자의 움직임을 자동으로 보정하는 환자위치 자동 보정 시스템을 개발하는 것이 목표이다. 이에 앞서 소형 3차원 위치보정시스템에 대한 알고리즘 및 하드웨어를 개발하여 안전한 방사선치료를 할 수 있는 가능성을 연구하고자 한다.

재료 및 방법

1. 소프트웨어 알고리즘 개발

자동 환자위치보정 시스템의 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 치료 전 계획된 환자의 치료위치에서 레이저빔에 맞추기 위한 환자 몸에 그린 십자형태의 문신(tattoo)이나 환자개인의 몸에 있는 점 또는 인위적으로 치료 전 위치를 표시하기 위한 일정 모양의 얇은 접착 시트(sticker) 등의 전하결

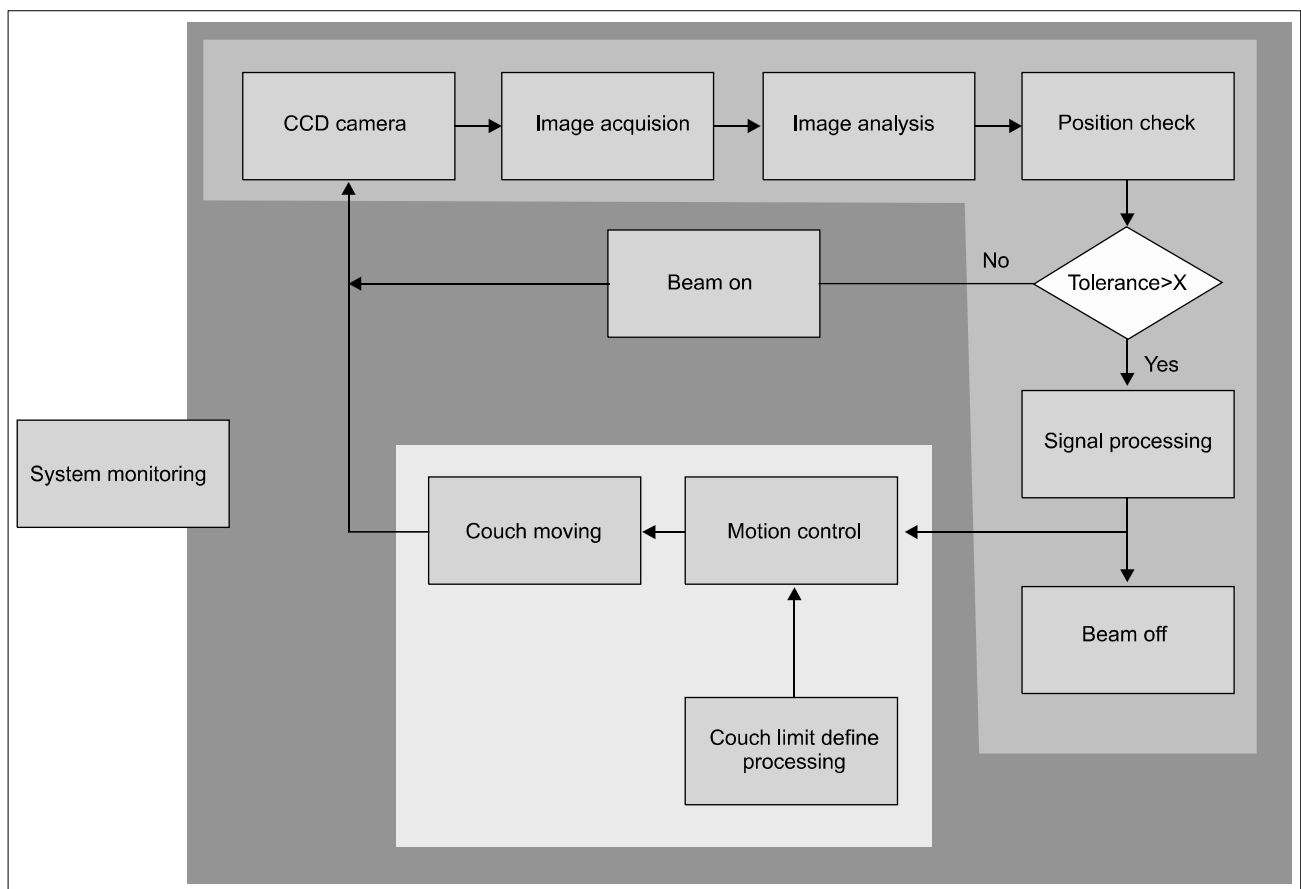


Fig. 1. Schematic diagram for algorithm of automatic patient position correction system software and hardware.

합소자 카메라영상을 기준 영상(template image)으로 만든다. 만들어진 기준영상은 환자 치료 시 전하결합소자 카메라로 촬영되어 전송되어지는 실시간 환자의 위치영상과 비교하여 처음 계획된 치료위치에 치료위치의 중심이 위치하는지를 확인 한다. 이때 치료 중 환자의 치료위치가 기준영상과 비교하여 허용범위를 벗어나게 될 경우 경고메시지와 함께 방사선을 자동으로 차단하게 된다. 빔이 차단된 상태에서 전하결합소자 카메라에서 확인된 환자의 치료위치변화를 정량적으로 측정하여 이동 제어장치(motion controller)에 정보를 전달하여 환자를 원래 치료위치로 이동시켜준다. 이때 카메라는 환자의 위치를 다시 확인 한 후 치료위치에 온 것을 확인하게 되면 다시 방사선을 조사하게 된다.

2. 하드웨어 구성 및 설계

실시간으로 촬영된 환자의 위치영상은 Labview 2010과 Vision Assistant 2010 (National instrument, USA)을 이용해 영상분석에 일반적으로 널리 사용되는 틀맞춘상호교차법을 이용한 영상패턴 맞춤 방법을 이용한 환자위치 확인 프로그램을 개발하였다.⁹⁾ 전하결합소자 카메라는 2대의 PoE (Power over Ethernet; IEEE 802.3af protocol) 기반의 칼라전하결합소자 카메라 ACA1300-30gc (Basler, Germany)를 사용했으며 카메라 렌즈는 M12VM412 4.0~12 mm 1 : 1.2 (Tamron, Japan)을 함께 사용하였다. 전하결합소자 카메라

로부터 촬영된 영상을 획득하고 컴퓨터로 전달하여 분석하고, 빔의 켜고 끄를 위한 방아쇠 신호(trigger signal) 발생과 motion couch의 모터를 구동하기 위해 NI cRIO-9024, NIcRIO-9481, NI cRIO-9512 (National instrument, USA)를 사용하였다. 이들은 Fig. 2와 같이 카메라와 모터를 Gigabite POE (power of ethernet)을 중심으로 이더넷 방식으로 연결되어 빠른 제어를 할 수 있게 하였다.

2대의 카메라로부터 얻어진 영상은 근거리통신 선을 통해 영상분석용 컴퓨터로 전송된다. 영상분석을 통해 실시간으로 환자의 위치변화를 측정하고 측정된 보정값은 실시간 움직임 제어시스템으로 전달되고 모터를 움직이게 된다. 동시에 빔 켜고 끄 방아쇠 신호도 함께 디지털 출력 모듈로 전달되어 치료빔을 조절하게 된다.

프로그램을 구동하기 위한 컴퓨터는 Intel i7 3770 3.4 GHz Quad core CUP (Intel, USA)를 사용하였으며 빠른 그래픽 처리를 위해 1 GB 메모리용량의 775 MHz GPU 그래픽 카드를 사용하였다.

3차원 이동 팬텀은 3개의 스텝모터를 사용하여 중심점으로부터 ± 15 cm 내에서 X, Y, Z를 각각 독립적으로 구동할 수 있게 설계되었다. 가장 아래 공간은 이동제어를 위한 장치, 전원공급 장치 및 이더넷 장치 등이 들어갈 수 있도록 높이가 200 mm로 설계되었다. 장비의 견고성과 하중을 고려하여 7 mm 알루미늄 판을 사용하도록 설계 하였다.

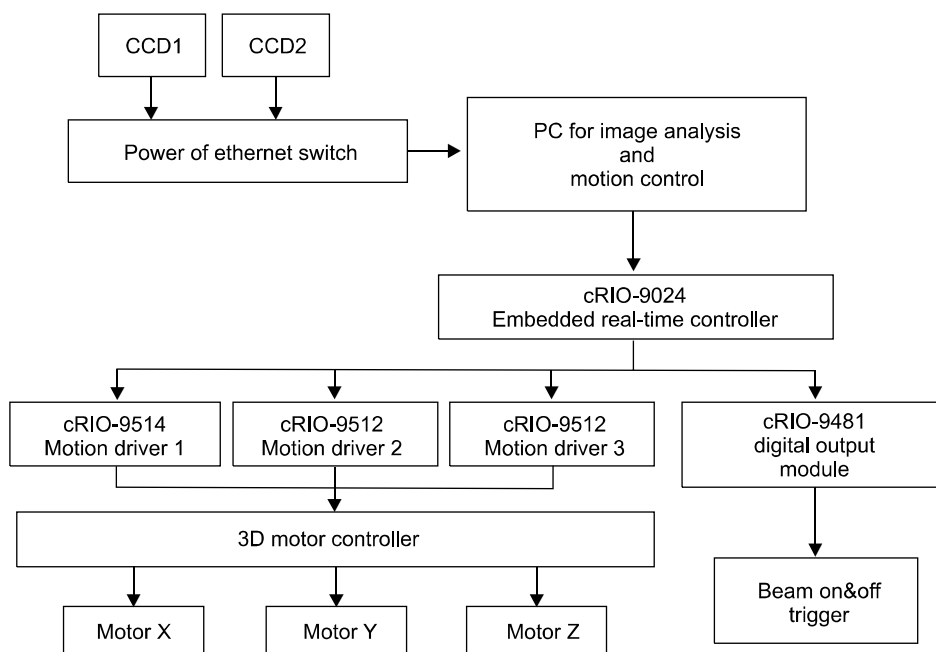


Fig. 2. Schematic diagram for H/W connection for automatic patient position correction system.

결 과

1. 소프트웨어 알고리즘 개발

Fig. 3에서와 같이 컬러전하결합소자 카메라로부터 얻어진 영상은 Gigabit Ethernet을 사용하여 1,000 Mbps의 초고속의 전송속도로 컬러 영상 데이터를 컴퓨터로 전송한다. 컬러 전하결합소자 카메라로부터 얻어진 영상은 컴퓨터에서 “형태 우선 정합(shape only matching)”, “색깔과 형태 정합(color and shape)”, “색깔 우선 정합(color only)”의 3가지 본 맞춤 방법을 선택할 수 있게 하였다. 색깔 형태 정합 본 맞춤의 경우 주변에 유사한 본이 있을 경우에 목표물의 본과 색깔까지 고려함으로써 보다 정확한 영상의 본 맞춤과 이를 통한 효율적인 이동 제어가 가능하게 하기 위해서이다. 두개의 전하결합소자 카메라로부터 동시에 들어오는 영상은 환자의 위쪽으로부터 촬영되는 XY평면 영상과 측면에서 촬영되는 Z축의 높이 변화를 확인하는 화면으로 구분된다.

또한 각각의 영상은 독립적으로 분석이 가능하며, 치료시 환자의 움직임의 허용범위를 조절 하여 방사선의 켜고 끄를 결정하는 연동 허용범위와 움직임 환자를 원위치로 자동으로 이동시켜주는 움직임 보정 허용범위(motion correction tolerance range)를 각각 설정할 수 있다.

각각의 허용범위는 0에서부터 2 cm까지 조절 할 수 있으며, 환자의 움직임이 감지되면 프로그램 상에서 자동으로 연동만을 하고 움직임 보정은 수동으로 하거나, 모두 자동

또는 수동으로도 할 수 있도록 되어있다.

Fig. 3은 원통형 모형에 각각 빨간색과 파란색의 둥근 접착 시트를 붙여놓고 색상과 모양을 동시에 추적하도록 한 경우이다.

2. 하드웨어 구성 및 제작

Fig. 4에서와 같이 두 대의 전하결합소자 카메라는 제작된 3차원 이동 팬텀에 대해 서로 직교하도록 설치되었으며 방사선치료기의 갱트리에서 방사선이 조사되는 것을 모사

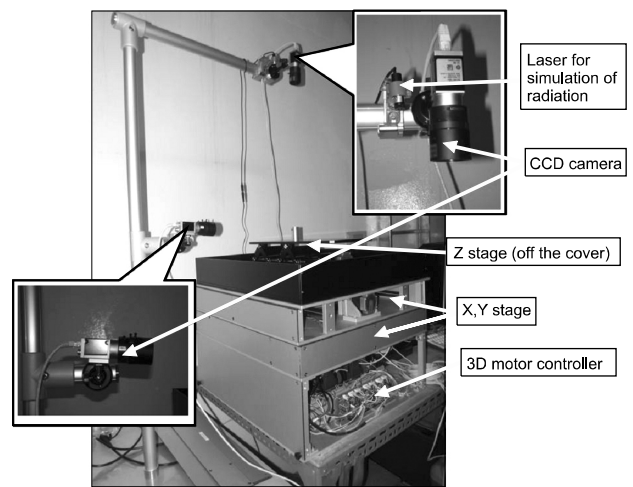


Fig. 4. The home made 3D moving phantom for automatic position correction system and CCD camera holder.

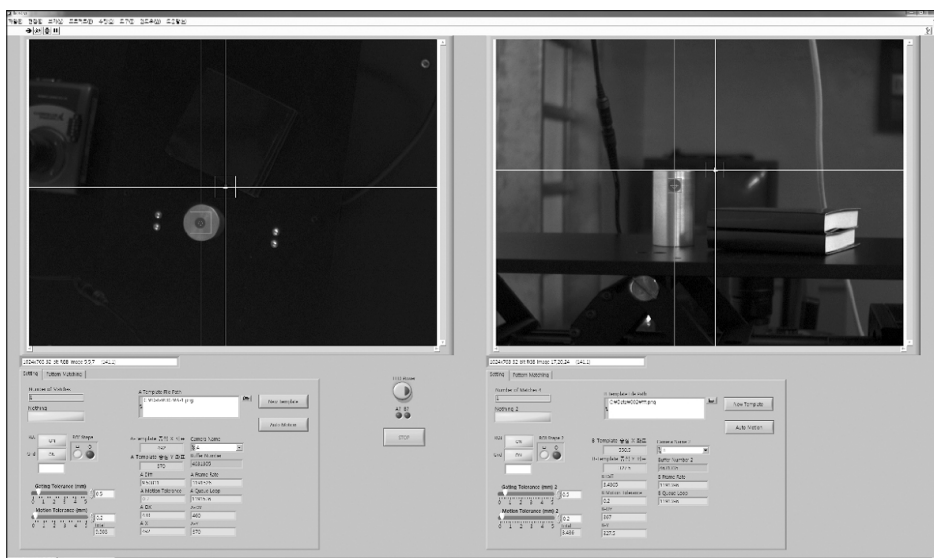


Fig. 3. Pattern matching example. (left) pattern matching circle point marker for x-y plane, (right) pattern matching circle point marker for z-axis.

하기 위해 소형 레이저를 설치하여 방아쇠 신호를 통해 빔의 켜고 끄미 되게 하였다. 방아쇠 신호는 선형가속기에서 연동을 위해 일반적으로 주고받는 5V TTL (Transistor to Transistor Logic) 신호를 사용하여 일반 방사선치료 및 양성자치료기에도 확장이 가능하도록 하였으며 응답 시간은 수 ms 이내이다. 전하결합소자 카메라는 POE를 사용하여 영상신호의 송수신은 물론 전원공급 또한 근거리통신망 선 하나로 모두 가능하도록 하여 가능한 장치를 간단하게 하였다. 또 두 대의 카메라는 항상 원점을 중심으로 직교하도록 설치하였으며 두 카메라에서 동시에 들어오는 영상을 통해 환자의 3차원적인 이동을 파악하고 정량적 분석이 가능하도록 하였다. 이동 팬텀은 XY 평면상으로 원점을 기준으로 ± 15 cm, Z 축 방향으로 ± 7 cm까지 이동하도록 제작되었다.

각각의 X, Y, Z 스테이지는 0.5 mm 이하의 분해능으로 이동이 가능하며 최대 50 kg 하중까지 견디도록 제작되었다.

결론 및 고찰

기존의 연동 장치의 경우 대부분이 환자의 호흡에 의한 종양의 위치를 추적하는 것을 주목적으로 하고 있다. 이는 종양의 움직임에 대한 가장 큰 원인이 호흡에 의한 것이기 때문이기도 하다. 그러나 본 연구는 환자의 호흡 뿐 아니라 치료중 환자의 인위적 또는 무의식적 움직임에 대한 것까지 고려해야 할 필요가 있다. 본원에서 일반적인 3차원 방사선치료 및 세기변조 방사선치료 환자의 치료 전 준비위치와 방사선 조사가 끝난 치료 후의 위치 표시의 위치 차이를 확인 하였다. 특히 세기변조 방사선치료의 경우 환자가 누워있는 시간이 다른 일반 방사선치료에 비해 길어 환자의 위치변화가 더 길수 있다. 물론 피부마커의 위치 차이

가 환자의 움직임에 의한 종양의 위치 변화로 직결 된다고 볼 수는 없다. 피부의 밀립이나 중력에 의한 처짐 등도 원인일 수 있지만 일반적으로 X선 영상을 찍어 위치를 확인 하기 전 환자 몸에 그려진 십자모양의 그림을 이용하여 치료위치를 확인하기 때문에 이를 통해 차후 X선 영상을 이용한 위치확인 시스템의 개발을 위해 예비적인 결과값을 얻고자 함이다.

Table 1은 직장암 환자 5명에 대해 20일 간 치료 전 환자의 치료준비 위치와 방사선 치료 후 변화된 준비위치를 비교하여 위치 변화를 확인 한 것이다. 5명의 환자에 대해 가로 방향으로 평균 0.297 cm가 이동했으며 최대 1 cm가 변하였다. 길이 방향에서는 평균 0.141 cm 최대 0.8 cm가 이동하였다. 높이 방향에서는 평균 0.205 cm 최대 1.2 cm가 이동하였다. 이 결과로 환자에 따라 1 cm 이상의 위치 변화가 있으나 카메라의 거리가 환자와 멀어 일반적인 상황에서는 조정실내에서 환자의 움직임을 감지하기 어렵다는 것이다. 또한 큰 종양크기의 세기변조 방사선치료나 양성자의 실범 주사방식의 경우 방사선 조사 시간이 각 치료장(field)에 대해 일반 산란 조사 방법 보다 3배에서 10배인 1분 이상으로 방사선 조사시간이 길어지고 있어 전체 치료 시간이 3배 이상 증가하고 있다. 또 호흡연동치료의 경우 환자에 따라 30분 이상 치료시간이 소요되고 있으며 특히 종양의 크기가 큰 TOMO치료의 경우 그 치료시간은 더 길어질 수 있어 고통이 심한 환자의 경우 치료 시 움직일 수 있는 가능성이 높아지고 있다.

기존의 Ronald D와¹⁰⁾ Hwiyoung Kim 등¹¹⁾이 발표한 기존 연구에서는 모두 몇 개의 적외선 반사판 또는 마커를 이용하여 이들의 흑백 명암 영상을 분석하여 위치의 변화를 확인 환자의 치료준비 위치를 보정해 주는 시스템으로 유사한 기술들이 상용화 되기도 했다. 그러나 특히 양성자치료의 경우 빔의 특성상 이런 특정 마커나 장치를 환자의 몸

Table 1. The result of rectal cancer patient treatment setup position difference of between before treatment and after treatment.

Patient	Lateral (cm)		Longitudinal (cm)		Vertical (cm)	
	Mean \pm SD	Max	Mean \pm SD	Max	Mean \pm SD	Max
1	0.115 \pm 0.135	0.5	0.07 \pm 0.103	0.3	0.18 \pm 0.144	0.5
2	0.329 \pm 0.199	0.7	0.194 \pm 0.241	0.6	0.206 \pm 0.139	0.5
3	0.433 \pm 0.319	1.0	0.167 \pm 0.161	0.5	0.339 \pm 0.301	1.2
4	0.222 \pm 0.236	0.7	0.089 \pm 0.137	0.5	0.094 \pm 0.106	0.4
5	0.387 \pm 0.219	0.7	0.187 \pm 0.219	0.8	0.207 \pm 0.258	0.6
Average	0.297 \pm 0.222	0.72	0.141 \pm 0.172	0.54	0.205 \pm 0.189	0.64

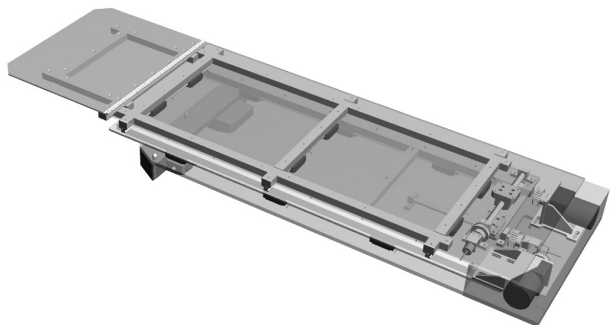


Fig. 5. Schematic diagram for 3D modeling of the 3D moving couch for heavy moving phantom motion correction verification.

에 부착하거나 환자의 몸에 움직임을 고정시킬 수 있는 환자 고정장치의 사용이 치료법의 특성에 영향을 줄 우려가 있어 사용상 어려움을 갖고 있어 움직임을 확인 하는 시스템의 실용성이 떨어지며 어두운 실내 환경을 유지하여야 하는 단점이 있어 이를 보완하기 위해서는 본 시스템과 같은 본 맞춤 방식이 유리하다. 또한 이들은 2대의 카메라를 켄트리가 바라보는 방향에서 입체영상을 획득할 수 있도록 배치하여 갠트리나 치료대의 회전에 영향을 받지 않게 하였다. 그러나 본 연구에서는 카메라의 배치를 직교하도록 설치하는 방식으로 갠트리나 치료대의 회전에 대한 고려가 필요하다. 따라서 켄트리와 치료대에 직접 카메라를 설치하거나 갠트리 헤드부분에 직교하는 카메라 설치대를 고정하는 방법 등 또한 앞으로 해결해야 할 문제로 남아있다.

또한 현재 시스템에서는 환자의 평면이동 및 회전 이동에 대한 보정을 고려하고 있으나 환자의 유동적인 체표면의 움직임은 고려하고 있지 않다. 현재 알고리즘에서는 측면 카메라로부터 들어오는 영상정보에서 높이의 변화만 보정하고 있으며 길이방향의 보정은 XY평면에서만 보정하고 있다. 따라서 이에 대한 연구가 더 진행 될 필요가 있다.

본 실험에서 사용하고 있는 전하결합소자 카메라 기반의 환자위치 추적 장치로는 정확한 종양의 위치 변화를 확인하기는 어렵다. 따라서 X선 영상을 이용한 종양의 위치 확인 시스템의 개발이 필요하며 본 연구의 최종 목표이기도 하다. James 등¹²⁾은 진단용 X선 영상을 이용하여 환자의 치료준비 위치를 확인 하고 보정하는 연구를 발표하였다 이는 치료전 환자의 위치를 확인 하는데 좋은 방법으로 현재 양성자치료기의 환자 치료준비위치 확인에 사용되는 기술과 동일하다. 그러나 이 기술의 한계는 치료 전의 위치만 확인 할 뿐 치료 중의 위치 변화는 알기 어렵다는 단점이

있다. 따라서 Fig. 5와 같이 본 연구의 3차원 이동 팬텀을 발전 시켜 실제 치료실의 환자 치료테이블에 부착할 수 있고 연동 시스템 까지 연결이 가능한 portable 이동 치료대를 설계 제작 중에 있다. 이를 이용하여 실제 환자의 움직임을 모사한 실험이 이루어질 예정이다.

또한 본 연구에서 환자의 움직임이 호흡에 의한 자연스러운 움직임인지 아니면 인위적인 또는 무의식적인 치료에 영향을 줄 수 있는 움직임인지를 분간 할 수 있는 방법 또한 개발이 필요하다. 따라서 환자의 호흡패턴을 인지하고 이를 바탕으로 통계적 모델링을 설정 한 후 이를 바탕으로 설정된 움직임의 허용범위를 정하고 호흡에 의한 움직임을 배제한 실제 움직임만을 분별하는 연구 또한 병행 할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Cho BC, Huh HD, Kim JS, et al: Guideline for imaging dose on image-guided radiation therapy. *Progress in Medical Physics* 24(1):1-24 (2013)
2. ICRU Report 62: Prescribing Recording and Reporting Photon Beam Therapy (supplement to ICRU Report 50). International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. (1999)
3. Kwon KT, Lim SW, Park SH, et al: Evaluation of difference between skin motion and tumor motion for respiration gated radiotherapy. *Progress in Medical Physics* 19(1):14-20 (2008)
4. Huh HD, Choi SH, Kim WC, et al: Analysis of dose distribution on critical organs for radiosurgery with cyberknife real-time tumor tracking system. *Progress in Medical Physics* 20(1):14-20 (2009)
5. Seo JH, Kang YN, Jang JS, et al: Estimation of cyberknife respiratory tracking system using moving phantom. *Progress in Medical Physics* 20(4):324-330 (2009)
6. Hsi WC, Moyers MF, Nichiporov D, et al: Energy spectrum control for modulated proton beams. *Medical Physics* 36(6):2297-2308 (2009)
7. Anferov VA: Scan pattern optimization for uniform proton beam scanning. *Medical Physics* 36(8):3560-3567 (2009)
8. Farr JB, Dessy F, De Wilde O, et al: Fundamental radiological and geometric performance of two types of proton beam modulated discrete scanning systems. *Medical Physics* 40(7):07210-1-07210-8 (2013)
9. NI Vision Concepts Manual. National Instrument, Austin Texas (2005). pp. 12-7-8
10. Rogus RD, Stern RL, Kubo HD: Accuracy of a photogrammetry-based patient positioning and monitoring system for radiation therapy. *Medical Physics* 26(5):721-728 (1999)
11. Kim HY, Park YK, Kim IH, et al: Development of an optical-based image guidance system: Technique detecting ex-

ternal markers behind a full facemask. Medical Physics 38(6):3006-3012 (2011)

agnostic imaging system for measurement of patient setup. Medical Physics 25(12):2385-2387 (1998)

12. Schewe JE, Lam KL, Balter JM, et al: A room-based di-

CCD기반의 방사선치료 중 실시간 자동 환자 위치보정 시스템 개발: 타당성 연구

*국립암센터 양성자치료센터, [†]서울삼성의료원 방사선종양학과, [‡]고려대학교 보건의학 바이오융합공학과

신동호* · 정광주[†] · 김미영* · 손재만*[‡] · 윤명근[‡] · 임영경* · 이세병*

방사선 치료 시 방사선이 조사되는 동안 환자의 움직임을 모니터링하는 것은 치료의 성공을 결정 하는 중요한 요인이다. 따라서 방사선이 조사되는 동안 환자의 움직임을 실시간으로 감시하고 움직인 치료위치를 자동으로 보정 할 수 있는 시스템을 개발 하였다. 원점을 중심으로 직교하게 위치한 2개의 CCD 카메라를 이용하여 3차원적 환자의 위치를 확인 하고, 틀 맞춘 상호교차 비교법(normalized cross-correlation method)을 이용한 영상 본 맞춤(image pattern matching) 방법을 이용한 환자위치 모니터링 시스템을 개발하였다. CCD카메라로부터 촬영된 영상을 컴퓨터로 전달하여 위치 변화를 정량 적으로 분석 하여 빔 켜고 끄기(beam on and off)를 위한 방아쇠신호(trigger signal)를 발생시키고, 이동치료대(moving couch)의 모터를 제어할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 0.5 mm 이하의 분해능으로 환자의 위치를 자동으로 보정할 수 있었다.

중심단어: 3차원 무빙 테이블, 위치보정, 환자위치, 게이팅